

# 基于半导体量子点的 量子计算与量子信息

Quantum Information and Computation of Semiconductor Quantum Dots



王取泉 程木田  
刘绍鼎 王霞 著  
周慧君

中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书以清晰的物理图像和丰富的实验结果比较全面地介绍了基于半导体量子点激子的量子计算和量子信息方面的最新研究进展。全书共分8章,第1章和第2章是半导体量子点形貌结构和基本特性简要介绍;第3章至第5章是关于激子量子比特旋转和量子逻辑运算等量子计算方面的研究进展;第6章至第8章则是关于激子复合单光子发射和纠缠光子对发射等量子信息方面的研究进展。

本书可以作为凝聚态物理、光学、材料科学、量子计算科学等有关专业的高年级本科生和研究生的教学参考书,也可供上述领域的科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于半导体量子点的量子计算与量子信息/王取泉等著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02222-7

I. 基… II. 王… III. 半导体—量子论—研究 IV. O471.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 187752 号

**出版发行** 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路96号,邮编 230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

**印 刷** 合肥晓星印刷有限责任公司

**经 销** 全国新华书店

**开 本** 710mm×1000mm 1/16

**印 张** 24

**字 数** 393 千

**版 次** 2009 年 1 月第 1 版

**印 次** 2009 年 1 月第 1 次印刷

**印 数** 1—2000 册

**定 价** 68.00 元

# 总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

# 前 言

量子计算和量子信息是当今物理学前沿热点研究领域之一。随着纳米材料科学和实验技术的发展,在原子和分子体系多年的研究积累的基础上和相关理论研究的推动下,近几年来在固态量子计算和量子信息方面取得了一系列具有标志性意义的研究进展。其中,被称为“人工原子”的半导体量子点体系,具有可集成性和可扩展性的优点,并且与现有的半导体光电子技术有紧密的联系,从而受到人们的极大关注。

自 2001 年 Stievater 等在单个 InGaAs 半导体量子点中观测到激子的 Rabi 振荡(对应于一个单量子比特的翻转)以来[Phys. Rev. Lett. 87, 133603(2001)],在随后的 5 年多的时间里相继取得了一系列有突破性意义的重要研究进展。2002 年,Zrenner 等实现了半导体量子点单电子二极管[Nature 418, 612(2002)];2003 年,X. Q. Li 等在单个半导体量子点中实现了 CROT 量子逻辑门[Science 301, 809(2003)];2005 年,Q. Q. Wang 等实现了两个激子量子比特上粒子数的交换[Phys. Rev. Lett. 95, 187404(2005)];2006 年,Scholz 等利用半导体量子点单光子源进行了 Deutsch - Jozsa 逻辑运算[Phys. Rev. Lett. 96, 180501(2006)];最近,Akopian 和 Stevenson 相继报道了半导体芯片上量子点的可控纠缠光子对的发射[Phys. Rev. Lett. 96, 130501(2006); Nature 439, 179(2006)]。

以上一系列重要研究成果同样也吸引了国内科技工作者和爱好者的兴趣,但是国内书刊对相关方面的报道却很少。本书的目的有两点:

一方面是为了即时将这一领域的重要研究成果融入教学之中,满足广大青年学生对这个新生交叉研究领域新知识点的兴趣;另一方面也给相关科技工作者和爱好者提供一本前沿课题的参考书。

由于基于半导体量子点的量子计算和量子信息的研究涉及物理学中凝聚态物理、量子光学、超快非线性光学以及微纳半导体材料和器件等多个学科的交叉,因此,本书中涉及的相关知识点也比较多。为了便于本科生和研究生以及爱好者的阅读,对书中所涉及的量子力学运动方程给出了比较详细的推导过程,全书共分8章由浅入深地进行介绍。第1章和第2章简要介绍半导体量子点基本特性,其中第1章是关于半导体量子点形貌结构特征,第2章是关于半导体量子点的基本相干特性和单量子点的实验探测技术。第3章至第5章涉及量子计算:第3章介绍半导体量子点激子量子比特旋转及其品质因子,并且比较深入地讨论了量子点体系中多种复杂的退相干机制对其品质因子的影响;第4章介绍半导体量子点中实现 CNOT 量子逻辑门以及 Deutsch - Jozsa 逻辑运算,这两者是量子计算中的基本量子逻辑操作;第5章分析和讨论半导体量子点中激子自旋的弛豫机制,并介绍利用相干光学方法实现激子自旋的交换。第6章至第8章涉及量子信息:其中第6章和第7章分别介绍半导体量子点的单光子发射和级联多光子发射过程;第8章介绍半导体芯片上单个半导体量子点发射纠缠光子对的特性,分析和讨论多种因素对光子偏振纠缠度的影响。在本书的第3章至第8章中,融入了我们在此领域发表的二十余篇研究论文的成果。书中每一章都详细给出了相关研究点上的重要参考文献,这便于读者查阅原始研究论文和进一步研究。

由于该领域研究进展很快,加之作者研究能力和精力所限,还有部分重要研究内容(如荷电半导体量子点以及激子与微腔相互作用等方面)没有在本书中讨论。对于本书中的错误和不妥之处,恳请读者赐教和指正。

感谢国家自然科学基金委和科技部的资助。衷心感谢薛其坤院士和 C. K. Shih 教授的热心指教和大力帮助。

作 者

2006 年 12 月 于珞珈山

# 目 次

总序 .....	i
前言 .....	iii
<b>第 1 章 半导体量子点形貌结构特征</b> .....	<b>1</b>
引言 .....	1
1.1 界面涨落量子点 .....	1
1.2 自组织量子点 .....	5
1.2.1 量子点的自组织生长机制 .....	5
1.2.2 自组织量子点的密度控制 .....	8
1.3 耦合量子点 .....	11
1.3.1 自组织纵向耦合量子点 .....	11
1.3.2 自组织横向耦合量子点 .....	14
1.3.3 二维电子气耦合量子点 .....	15
1.4 微腔中的量子点 .....	16
<b>第 2 章 半导体量子点基本相干特性和单量子点探测技术</b> .....	<b>34</b>
引言 .....	34
2.1 半导体量子点基本相干特性 .....	34
2.1.1 半导体量子点的分立能级结构 .....	34
2.1.2 量子干涉与能级寿命 .....	36
2.1.3 量子拍与能级劈裂 .....	37
2.1.4 粒子数 Rabi 振荡 .....	38
2.2 单量子点探测技术 .....	41

2.2.1 差分透射法	41
2.2.2 纳米光谱成像法	42
2.2.3 纳光电流法	43
<b>第3章 半导体量子点激子量子比特旋转及其品质因子</b>	<b>48</b>
引言	48
3.1 量子比特旋转基本概念	49
3.1.1 二能级体系波函数矢量与量子比特球	49
3.1.2 二能级体系粒子数运动方程	50
3.1.3 二能级体系 Bloch 矢量与 Bloch 球	52
3.1.4 量子比特旋转及其品质因子的定义	54
3.2 半导体量子点激子量子比特自由旋转品质因子 $Q_0$	55
3.2.1 双脉冲激发下二能级体系粒子数运动方程	55
3.2.2 激子量子比特自由旋转及其品质因子 $Q_0$	57
3.3 半导体量子点激子量子比特 Rabi 振荡品质因子 $Q_R$	58
3.3.1 单个半导体量子点中 $10\pi$ Rabi 振荡的观测	58
3.3.2 激发脉冲宽度对 Rabi 振荡品质因子 $Q_R$ 的影响	59
3.4 Rabi 振荡退相干机制的分析	60
3.4.1 浸润层泄漏与 Auger 俘获的影响	60
3.4.2 双激子的影响	65
3.4.3 纯位相退相干的影响	68
<b>第4章 半导体量子点中的量子逻辑运算</b>	<b>74</b>
引言	74
4.1 量子逻辑门和量子算法基本概念	75
4.1.1 基本量子逻辑门	75
4.1.2 量子逻辑门的符号表示和量子线路	79
4.1.3 量子算法	80
4.1.4 量子操作保真度	84
4.2 单个半导体量子点中实现控制旋转门 CROT	85
4.2.1 半导体量子点双激子构成的两个量子比特体系	85
4.2.2 理想双激子体系中控制旋转门 CROT 操作方案	86
4.2.3 实际双激子体系中 CROT 操作的粒子数运动和实验	



结果 .....	88
4.3 利用量子交换操作实现两个量子比特态上的粒子数交换 .....	91
4.3.1 理想半导体量子点体系两个量子比特态上的粒子数交换 .....	91
4.3.2 V型体系在双脉冲激发下的粒子数运动特性 .....	95
4.3.3 两个量子比特态上的粒子数交换操作实验结果 .....	100
4.4 半导体量子点中 Deutsch - Jozsa 量子逻辑运算 .....	101
4.4.1 单量子比特优化 Deutsch - Jozsa 算法的操控方案 .....	101
4.4.2 单量子比特优化 Deutsch - Jozsa 算法的实验结果 .....	104
4.4.3 两个量子比特常规 Deutsch - Jozsa 算法的操控方案 .....	105
4.4.4 两个量子比特优化 Deutsch - Jozsa 算法的操控方案 .....	113
<b>第 5 章 半导体量子点中激子自旋弛豫和自旋交换 .....</b>	<b>128</b>
引言 .....	128
5.1 半导体量子点中能级解简并与线偏振本征态及其激子自旋 .....	129
5.2 半导体量子点中激子自旋弛豫特性 .....	130
5.2.1 半导体量子点中激子自旋弛豫的实验观测 .....	130
5.2.2 半导体量子点中激子自旋弛豫的外在机制分析 .....	131
5.2.3 半导体量子点中激子自旋弛豫的内在机制分析 .....	134
5.3 利用 $U_f$ 控制门实现激子自旋交换 .....	136
5.3.1 $U_f$ 控制门与类 Deutsch 量子逻辑运算 .....	136
5.3.2 利用类 Deutsch 逻辑运算实现激子自旋交换 .....	137
<b>第 6 章 半导体量子点单光子发射 .....</b>	<b>144</b>
引言 .....	144
6.1 光发射统计特性基本概念 .....	144
6.2 连续激发下单光子发射 .....	146
6.2.1 双时归一化二阶自相关函数的量子力学形式 .....	146
6.2.2 量子力学算符的期望值和量子回归定理 .....	147
6.2.3 归一化二阶自相关函数的稳态解 .....	148
6.2.4 多个独立量子点体系的归一化二阶自相关函数 .....	149
6.3 脉冲激发下单光子发射 .....	151
6.3.1 脉冲激发下二阶自相关函数的定义 .....	151
6.3.2 脉冲激发下粒子数运动方程 .....	152

6.3.3	脉冲激发下二阶自相关函数的运动方程 .....	153
6.3.4	单光子发射效率 .....	155
6.4	脉冲激发下交叉偏振单光子发射 .....	159
6.4.1	V型多能级体系粒子数运动方程 .....	159
6.4.2	V型多能级体系二阶互相关函数运动方程 .....	162
6.4.3	交叉偏振单光子发射 .....	164
6.5	由脉冲激发过渡到连续激发 .....	166
6.6	半导体量子点单光子发射实验观测 .....	167
6.6.1	HBT光子相关度测量装置 .....	167
6.6.2	连续激发下归一化二阶自相关度的测量 .....	168
6.6.3	脉冲激发下二阶自相关函数的测量 .....	169
<b>第7章</b>	<b>半导体量子点级联多光子发射 .....</b>	<b>173</b>
	引言 .....	173
7.1	单量子点中双激子三能级体系级联光子对的发射特性 .....	174
7.1.1	双激子三能级体系粒子数运动方程 .....	174
7.1.2	双激子三能级体系二阶交叉相关函数运动方程 .....	176
7.2	耦合量子点双激子体系级联光子对的发射特性 .....	179
7.2.1	耦合量子点双激子体系的粒子数运动方程 .....	179
7.2.2	耦合量子点双激子体系的二阶交叉相关矢量运动方程 .....	183
7.2.3	级联发射与脉冲面积的关系 .....	186
7.3	三激子体系级联光子对的发射特性 .....	188
7.3.1	三激子体系粒子数运动方程 .....	188
7.3.2	三激子体系二阶交叉相关函数运动方程 .....	192
7.3.3	级联发射与脉冲面积的关系 .....	196
<b>第8章</b>	<b>半导体量子点中可控纠缠光子对的发射 .....</b>	<b>200</b>
	引言 .....	200
8.1	“光子对”偏振纠缠基本概念 .....	201
8.1.1	“光子对”偏振态偏振密度矩阵 .....	201
8.1.2	光子偏振态的变换 .....	201
8.1.3	光子偏振态偏振密度矩阵的测量 .....	205
8.1.4	纠缠判据与纠缠度 .....	208

8.2	半导体量子点双激子体系能级结构 .....	213
8.3	简并双激子体系纠缠光子发射特性 .....	214
8.3.1	理想简并双激子体系纠缠光发射特性 .....	214
8.3.2	自旋弛豫对二阶互相关函数和纠缠度的影响 .....	215
8.4	非简并双激子体系频谱过滤与纠缠光发射 .....	217
8.4.1	非简并双激子体系非纠缠光发射特性 .....	217
8.4.2	非简并双激子体系频谱过滤法产生纠缠光的原理 .....	218
8.4.3	频谱法分析谱过滤非简并双激子体系纠缠光发射 .....	219
8.4.4	主方程法分析谱过滤非简并双激子体系纠缠光发射 .....	221
附录 1.1	半导体量子点中量子计算和量子信息标志性实验研究进展 (2001—2006) .....	229
附录 2.1	单量子点能级结构示意图以及单量子点探测技术 .....	230
附录 3.1	含浸润层和双激子等多能级跃迁的粒子数运动方程 .....	232
附录 4.1	激子-双激子四能级体系激子动力学方程 .....	246
附录 4.2	双脉冲激发下 V 型三能级系统激子动力学方程 .....	258
附录 5.1	含粒子数泄漏与 Auger 俘获的激子自旋弛豫动力学 方程 .....	267
附录 6.1	量子回归定理及其推论 .....	280
附录 6.2	脉冲激发下简单三能级体系二阶相关函数运动方程 .....	282
附录 6.3	脉冲激发下 V 型体系二阶相关函数运动方程 .....	289
附录 7.1	双激子三能级体系二阶相关函数运动方程 .....	302
附录 7.2	脉冲激发下耦合量子点体系的二阶相关函数运动方程 .....	313
附录 7.3	激子-双激子-三激子体系运动动力学方程 .....	337
附录 7.4	脉冲激发下激子-双激子-三激子体系二阶相关函数运动 方程 .....	349
附录 8.1	作者及其课题组发表的相关研究论文 .....	368

# 第 1 章 半导体量子点形貌结构特征

## 引 言

半导体量子点是指三维空间受限的半导体纳米结构。纳米尺度下的量子限制效应造成其类似原子的分立能级,因此,半导体量子点也被称为“人工原子”。通过控制量子点的形状和大小可以有效地调节其能级结构,从而极大地扩展了半导体器件的应用领域。近年来,半导体量子点在量子计算和量子信息方面的研究备受人们的关注,并且已经取得了一系列的重要进展。

半导体量子点的制备工艺和方法多种多样,如由量子阱异质结构界面起伏涨落而自然形成的界面涨落型量子点(IFQDs)、分子束外延生长中应力造成的自组织量子点(SAQDs)、微纳加工刻蚀形成的量子点以及化学方法合成的量子点,等等。前三种方法直接将量子点生长和加工在半导体芯片上,有利于其集成器件的研究和应用。本章共四节,分别简要介绍界面涨落量子点、自组织量子点、耦合量子点以及微腔中的量子点的形貌结构特征。

### 1.1 界面涨落量子点

界面涨落型量子点(IFQDs)最初是在半导体量子阱异质界面观察到

的。以最典型的、研究最多的 GaAs/AlAs 为例,用分子束外延生长(MBE)在 GaAs 基底上轮流生长 GaAs、AlAs 量子阱,形成 GaAs/AlAs 异质界面<sup>[1-5]</sup>。最初,人们致力于制造界面绝对平滑的量子阱异质结构,但是生长过程中 Ga 和 Al 与 As 的结合强度不同(Ga—As 键强度小于 Al—As 键),导致界面上 Ga 和 Al 的迁移长度不同,因而形成异质界面起伏涨落<sup>[1,6]</sup>。对窄量子阱而言,几个单层(ML)范围内的厚度起伏涨落就会导致相当大的界面势能升降<sup>[5]</sup>,量子阱相对较厚的地方,其限制能会低于周围部分,形成势阱,导致粒子横向运动受限。其能级结构如图 1.1 所示。

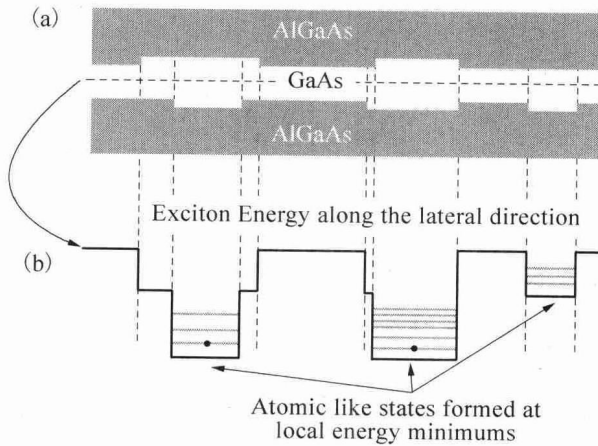


图 1.1 量子阱形貌结构示意图(a)及其能级结构示意图(b)

图 1.1 中量子阱异质结构为 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 三明治型,可见

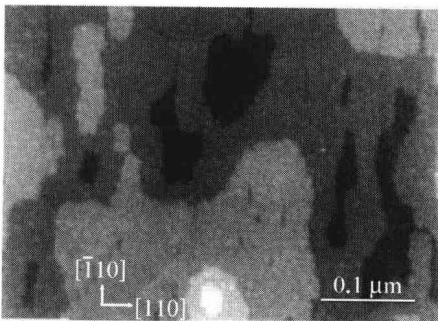


图 1.2 界面涨落型 GaAs 量子点 STM 像

GaAs 样品保持在生长温度下,处于 As 流中几分钟,未经冷却和其他测量。灰度表示高低。(引自 D. Gammon *et al.* Phys. Rev. Lett. 76, 3005(1996))

中间 GaAs 层相对较厚的地方,其能量低于周围,形成势阱,导致势阱中的粒子除纵向外,横向运动也受到限制。厚度越厚,势阱越深,对粒子横向运动的限制越强。这种厚薄不均匀的窄量子阱可以视为量子点的无序阵列,被称为界面涨落型量子点<sup>[4]</sup>。GaAs 量子点的实际形态如图 1.2 所示<sup>[7]</sup>。

由图 1.2 可见,界面涨落型量子点尺寸约为数百个 nm,沿一定的方向生长,高度约为 1 ML(单层),由于它

是随机生成,没有特定一致的形状和大小。界面涨落型量子点的这种定向生长特性会导致其光谱的偏振特性,将在量子点能级结构中细述。

低温下,单个界面涨落型量子点表现出类原子谱线,其激子能级结构和寿命对其形状和大小非常敏感,因此发光谱线位置也随形状大小不同而不同。对随机自然产生的界面涨落型量子点而言,其形状各异,尺寸分布较广,在同一样品上不同量子点的能级特性也会有所差异。通常观察到的半高宽达到几个 meV 的发光谱线是大量量子点发光的集合效应,难以观测单个界面涨落型量子点的分立能级所表现出的尖锐类原子谱线。1994 年, A. Zrenner 小组将激发光斑从  $100\ \mu\text{m}$  缩小到  $2\ \mu\text{m}$ ,即减少被激发的量子点数目,发现在原有的  $4.5\ \text{meV}$  半高宽的量子阱谱线上出现了尖锐的发光峰,半高宽约为  $0.5\ \text{meV}$ ,如图 1.3(a)所示。他们认为这些新的尖锐的发光峰来自不同的单个界面涨落型量子点<sup>[4]</sup>,由  $n = 1 \sim 7$  标示。但是此时仍未能将单个界面涨落型量子点的信息完全隔离出来。

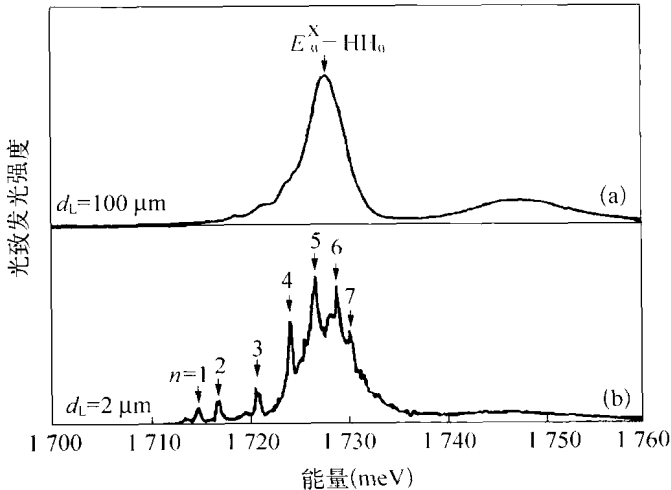


图 1.3 GaAs 界面涨落型 PL 图

(a) 当光斑直径  $d_L = 100\ \mu\text{m}$  时,为大量量子点集合发光峰;(b) 当光斑直径  $d_L = 2\ \mu\text{m}$  时,在集合发光峰上出现单个 GaAs 界面涨落型量子点的尖锐谱线,由  $n = 1 \sim 7$  标示。(引自 A. Zrenner *et al.* Phys. Rev. Lett. 72, 3382(1994))

随后,在像平面设置微孔将探测范围限制在  $1.5\ \mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>,以及在样品表面设置微孔 Al 掩膜<sup>[7, 9 16]</sup>,都观察到了单个界面涨落型量子点的发光。后一种方法在日后的单量子点研究中被广泛采用,量子阱发光特性随表面

Al 掩膜微孔大小的变化如图 1.4 所示<sup>[9]</sup>。可见,当孔径为  $25\ \mu\text{m}$  时,完全观察不到单个量子点的谱线;当孔径达到  $0.8\ \mu\text{m}$  时,能够观察到单个量子点的谱线,但大量量子点的集合发光宽峰仍然存在;当孔径达到  $0.5\ \mu\text{m}$  时,单个量子点发光峰才基本上完全分离出来。因此,当采用 Al 掩膜微孔观测单个量子点发光,或对单量子点进行相干操纵时,基本采用  $\sim 0.5\ \mu\text{m}$  的微孔<sup>[10-15]</sup>。如 2001 年, T. H. Stievater 在 GaAs 界面涨落型量子点中首次观察到量子点的 Rabi 振荡<sup>[11]</sup>。2003 年, X. Q. Li 等人在单个界面涨落型量子点首次实现 CROT 量子逻辑门全光操纵<sup>[13]</sup>。

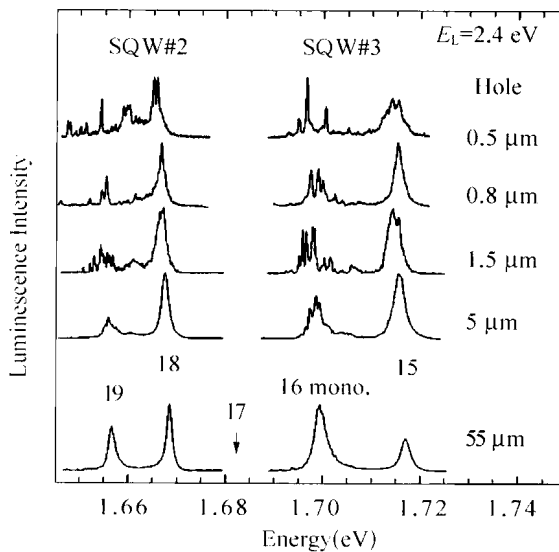


图 1.4 GaAs/AlAs 界面涨落型量子点 PL 谱随 Al 掩膜孔径大小的变化

(引自 D. Gammon *et al.*, Appl. Phys. Lett. 67, 2391(1995))

界面涨落型量子点线度大,束缚能弱,一般在  $50\ \text{meV}$  以内;激子能级间距小,约为几个  $\text{meV}$ ,能级寿命也较短;但其跃迁偶极矩大( $\sim 100\ \text{Debye}$ )<sup>[11]</sup>,与外场的作用强,其耦合强度直接由量子点内激子态束缚能决定<sup>[14]</sup>。不仅可以作为与半导体微腔耦合的电子跃迁(electron transition coupled to a mode of a semiconductor microcavity)<sup>[15, 17]</sup>,提高半导体微腔的  $Q$  因子和耦合常数<sup>[18]</sup>,还可以作为全光半导体量子逻辑门的量子比特<sup>[13, 19, 20]</sup>。在这类量子点中第一次观测单个量子点中的 Rabi 振荡<sup>[11]</sup>,并最早实现了两个比特 CROT 门的全光操纵<sup>[13]</sup>。

## 1.2 自组织量子点

相比于自然形成的界面涨落型量子点,自组织量子点(SAQDs)尺寸较小,一般为十几纳米,跃迁偶极矩小,但是量子限域效应强,且形状、大小以及位置更能够在很大程度上进行调控,并且在生长过程中就可以自然置入更复杂的结构之中,以获得某些特殊性质,从而更适合于制造量子器件。一般采取分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)、原子层外延(ALE)以及低压化学气象沉积(LPCVD)等技术制备,其中MBE生长由于不需要任何预加工处理,仅利用晶格失配材料之间的应变作用形成,所以不存在因表面损伤和引入杂质而导致的性能劣化问题,同时MBE生长系统具有 $1.33 \times 10^{-8}$  Pa超高真空度,可利用反射高能电子衍射(RHEED)对原位检测量子点的形成过程,直接获得生长动力学的相关信息,此外还可以实现高面指数量子点生长,改善量子点均匀性,因此成为制备自组织量子点的主导技术。

### 1.2.1 量子点的自组织生长机制

1938年,Stranski和Krastanow首次在异质外延离子晶体(heteroepitaxial ionic crystals)观察到岛的形成,因此这种岛的生长过程被称为Stranski-Krastanow生长,是由异质结构之间晶格失配产生应力积累导致的。几乎在所有的半导体异质结构中,只要组分间具有特定晶格失配,岛状生长(S-K)模式都会出现,并导致二维浸润层上纳米岛的形成。此法可用于制备Ⅲ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族和Ⅳ-Ⅳ族的半导体量子点,如Ge/Si<sup>[21-24]</sup>, InAs/GaAs, (In, Ga)As/GaAs, CdSe/Zn(S, Se)<sup>[25]</sup>和(In, Ga)N/GaN<sup>[26, 27]</sup>等量子点结构。量子点形状对生长条件非常敏感,有菱形、方形、金字塔形、球形、椭圆形和三角形等。此外,光谱区覆盖了从近红外( $\sim 1.5 \mu\text{m}$ )到蓝绿区域(430~500 nm)的范围。1985年Goldstein则首次观察



到半导体中岛的形成<sup>[28]</sup>。1990 年开始,不少人认识到这些岛就是零维半导体纳米结构<sup>[21, 22, 29]</sup>,在适当的生长条件下其尺寸分布比较均匀,可以实现一些量子器件。尤其是在 III—V 族半导体量子点的自组织生长中,由于 InAs 和 InGaAs 与 GaAs 存在较大的晶格失配度,因此对 GaAs 基底表面的 InGaAs 和 InAs 量子点的研究占据主要地位<sup>[30, 31]</sup>。同时此类量子点也是研究 S—K 生长的范本。以 GaAs 基底上生长  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  量子点为例:在  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  生长过程中,In, Ga 和 As 原子/分子束以一定比例一层一层沉积在 GaAs 基底上,形成浸润层。由于  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  晶格结构比 GaAs 基底大,其晶格失配度约为 7%,因此外延层被横向压缩而产生应力,如图 1.5 (a)所示。此应力随  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层厚度的增加而增加。当外延层厚度突破某一值时,浸润层生长结束,二维结构不能补偿积累的应力能,于是生成三维岛以释放应力,同时导致表面能增加,如图 1.5 (b)所示。三维  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  岛随生长条件不同而呈现不同的形状,如金字塔形,多面穹隆形以及透镜形等,为了避免成形的量子点变形坍塌,一般应在量子点层上再沉积数百原子层 GaAs,如图 1.5(c)所示。

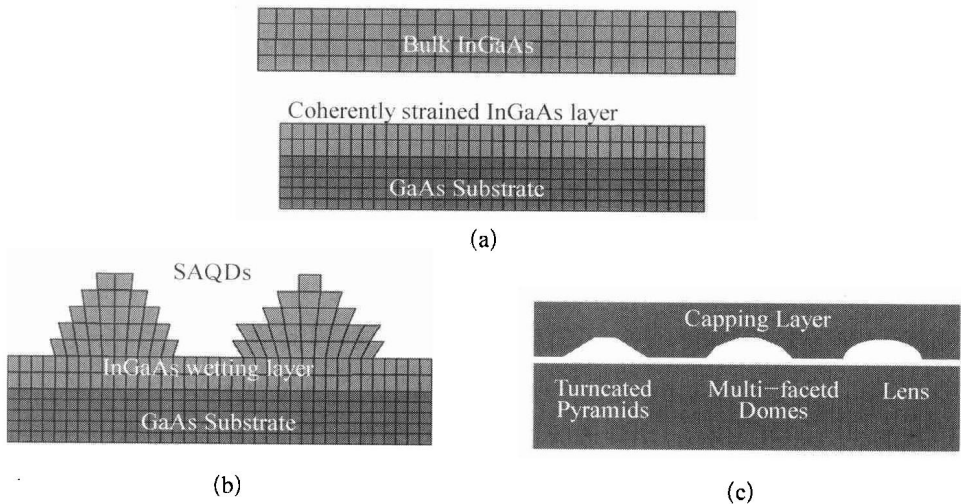


图 1.5 GaAs 基底上  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  量子点自组织生长机制示意图

自组织生长的量子点直径一般为 10~40 nm,高约 3~8 nm,密度范围为  $10^8 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,限制势能约为数百 meV。图 1.6 为 GaAs 基底上  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  自组织量子点的平面 AFM 像,可见其平均尺寸约 30~40 nm,量子点间距约 100 nm,尺寸分布~20%。